

유한요소법을 이용한 인공고관절 주대형태의 개선에 대한 연구

윤경렬*, 원에연**, 이수훈***

A Study for Improvement of the Femoral Stem Type using the Finite Element Analysis

Yoon, K. R.*, Won, Y. Y.** and Lee, S. H.***

ABSTRACT

A major mechanical problem with total hip replacement is the loosening of the femoral component. The loss of proximal support, with firm fixation distally, has been thought to be a major cause of fatigue failure of femoral stems. While many causes have been proposed, the most frequently suggested cause of the calcar resorption is the disuse atrophy of the cortex of the calcar due to the stress shielding of the proximal bone by the metal femoral stem. In this research, the new-designed stem(modified collar stem) was considered which made a hole inside stem and had a 3 mm thickness. Using the 3-dimensional finite element methods, the common collar stem and the modified collar stem was modeled and analysed. Also, the two models was compared. The results showed that the modified collar stem decreased the stress-shielding and it made a effective load transfer at the entire femoral region.

Key words : Finite element analysis, Stress shielding, Femoral stem

1. 서 론

인공고관절은 해부학적으로 골반(pelvis)에 부착하는 비구삽입물(acetabular)과 대퇴골에 부착하는 대퇴부품(femoral component)으로 구성되는데, 그 중에 대퇴부는 중심부의 대퇴부품 또는 대퇴주대(femoral component or femoral stem)와 외곽의 대퇴골(femur)로 구성된다. 인공고관절 전치환술(total hip arthroplasty)시 해결되지 못한 여러 문제들 중 가장 중요한 것은 부품의 해리(loosening of component)이다. 해리란 골에 대해 주대가 움직이는 것을 말하며, 주대와 뼈사이가 헐거워져서 결국 두 구조물사이에 움직임을 초래한다. 특히 과도한 응력집중(stress concentration)에 의한 경계층의 파괴나 응력차단(stress shielding)에 의한 대퇴골(calcar)부근의 골흡수(calcar resorption)는 대퇴부품의 해리를 초래하는 주요한 원인중의 하나이다. 이중 응력차단 현상은 인공고관절

전치환술에서 원래의 뼈조직과는 생역학적으로 성질이 다른 대퇴주대(femoral stem)를 삽입함으로써 일종의 복합재료를 형성하여 수술전의 부하 하중은 구조적으로 대퇴골에 전달되나 수술 이후에는 각각의 성질이 다른 대퇴골, 시멘트, 주대의 경계면 접촉으로 대퇴골에 훨씬 적은 부하가 전달되게 된다. 이와 같은 응력전달의 장애로 인해 응력차단 현상이 나타내게 된다. 응력차단 현상의 크기는 사용된 대퇴주대의 경계면의 조건 즉, 시멘트 사용형이나 골내성장형이나 또는 압박고정형이나에 따라 달라지게 되며, 골내성장형에도 골내성장을 위한 표면처리가 전체형(full coating)이나 부분형(partial coating)이나에 따라 응력의 크기, 분포가 달라지고 장기적으로는 경계면의 해리를 초래하게 된다. 그러나 사용된 대퇴주대의 굽힘응력(bending stress)은 응력차단 현상에 더욱 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다¹⁾. Wolff's law에 따르면 우리 인체의 기관은 원래 정상적으로 받던 응력이 어떤 원인으로 정정보다 적게 받으면 골은 골의 질량을 감소시킴으로서 새로운 환경에 적응하게 되며, 이 경우 내적재생(internal remodel-

*학생회원, 이주대학교 기계 및 산업공학부
**이주대학교 의과대학 정형외과
***이주대학교 기계 및 산업공학부

elling)으로는 골조송증(osteoporosis)이, 외적재생(external remodelling)으로는 골질의 두께의 감소나 골흡수등의 변화가 나타난다고 하였다^{12,13}. Carter등은 변형도 순응성 골재생(strain-adaptive bone remodelling)이론이란 수학적이론을 유한요소 해석법(FEM) 프로그램과 결합하여 Wolff's law가 사실임을 입증하였으며¹⁴, Huiskes는 Zweymuller SL형의 대퇴 주대 2차원 FEM모델을 사용하여 변형도 순응성 골재생 이론을 통하여 응력차단 현상이 대퇴골 근위부 골흡수를 일으키는 것을 증명하였으며, 최근에는 3차원 FEM모델을 이용한 연구에서도 동일한 연구결과를 보고하였다. 지금까지 이러한 응력차단 현상을 개선하기 위한 많은 방안들이 연구되고 있다^{15,16}.

본 연구에서는 인공고관절 전치환술시 대퇴에 미치는 응력차단 현상을 최소화시키기 위해 턱(collar)이 있는 표준형 직선 주대의 형태를 변경시키는 방안을 강구하였다. 이러한 변형된 주대(modified collar stem)와 기존의 주대(common collar stem) 사이의 응력분포를 유한요소법을 이용하여 대퇴거부위 응력차단에 미치는 영향을 조사 연구하였다. 결국, 주대의 형태 변화를 통해 대퇴부에 전달되는 응력향상을 관찰하여, 응력차단 현상의 개선에 효과적인 새로운 주대의 설계방안을 제시하고자한다.

2. 연구방법 및 유한요소 모델링

일반적으로 대퇴부의 응력차단 현상은 체중 부하의 특성 및 경계면의 조건들에 의해 영향을 받지만 사용된 주대에 따라 가장 크게 의존한다. 즉, 사용하는 주대의 재질이나 형상 그리고 크기에 의해 상당히 다른 응력의 크기와 분포를 보여준다. 이러한 요소들은 주대의 탄성계수(elastic modulus)와 2차 관성모멘트(second moment of inertia)와 직접 연관되어 주대의 굽힘강도(bending stiffness)를 변화시킨다. 그러나, 주대의 재질변경은 선택할 수 있는 재료가 한정되어 있고, 주대의 크기와 모양의 변경은 대퇴골의 크기와 시멘트층의 두께등을 고려할 때 그리 가변적이지 못하다. 결국 현재 사용되는 주대의 형태를 유지하면서, 응력차단 현상의 개선을 위해 굽힘강도를 크게 할 수 있는 방안이 필수적이였다. 이를 위해 본 연구에서는 주대의 내부를 비우고 일정한 두께를 갖는 변형된 주대(modified collar stem)를 선정하였다. 이 모델은 기존의 주대(common collar stem)와 같은 조건에서도 굽힘강도를 상당히 증가시켜 대퇴부의 응력전달을 적절히 할 수 있으리라 기

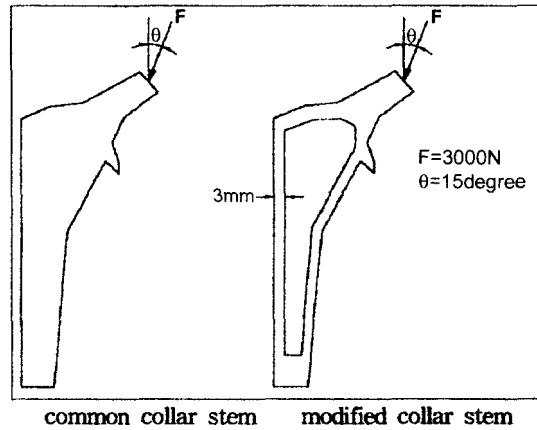


Fig. 1. The schematic diagram of common collar stem and modified collar stem.

대가 된다. 본 연구에서 사용된 기존의 주대(common collar stem)는 골시멘트를 사용하는 타입의 Multi-lock (Zimmer) stem으로 하였고, 변형된 주대(modified collar stem)는 기존의 주대(common collar stem)와 모양과 재질은 같고 내부가 비어있는 두께 3 mm의 주대로 하였다. Fig. 1에 기존의 주대(common collar stem)와 변형된 주대(modified collar stem)의 개념도를 나타냈다.

모델들의 유한요소 모델링과 해석을 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 SDRC사의 I-DEAS와, 하드웨어는 Silicon Graphics사의 Crimson 기종을 이용하였다. 두가지 모델에 대해 각각 전산응력 해석을 수행하여 결과를 비교 검토하였다.

2.1 유한요소 모델

인공고관절 전치환술시 사용되는 요소들의 유한요소 모델링은 크게 대퇴골(femur), 주대(stem), 골시멘트(cement)의 3부분으로 나누어진다. 실질적인 요소들의 유한요소 모델링은 대퇴골의 복잡한 형상, 불균일적(nonhomogeneous)이고 이방적(anisotropic)이며 점탄성적(viscoelastic)인 재료적 성질, 관절이 받는 하중의 동적인 특성, 경계면 시멘트의 불균일한 접합상태와 열응력, 그리고 뼈와 하중의 개인적 차이 등으로 정확한 모델의 선정이 어렵다. 전산응력 해석을 위해 이러한 조건들을 근사화시켜, 다음과 같은 단순화 모델을 사용하였다. 대퇴골-시멘트와 주대-시멘트 사이의 경계면은 완전 접착상태(bonded)로 가정하였고, 연구에 사용된 재료적 물성치는 균일 등방성(homogeneous)이며, 선형-탄성변형(linear-elastic)

을 한다고 가정하였다.

2.1.1 대퇴골(femur) 형상의 유한요소 모델

대퇴골은 근위부(proximal)의 전자부(trochanter)는 매우 불규칙적이며, 원위부(distal)는 삼각형과 원형의 중간형태를 하고 있다. 시멘트층의 바깥쪽은 피질골(cortical bone)로 하였고, 원위부 끝단의 시멘트 아래쪽은 해면골(cancellous)로 하였다.

2.2.2 주대(stem) 형상의 유한요소 모델

주대는 현재 사용중인 기존의 주대(common collar stem)와 내부가 빈 형태의 설계 변경된 변형된 주대(modified collar stem)로 나누어 모델링했다. 사용한 유한요소들은 3차원 linear brick solid element이다.

2.2.3 골시멘트(cement) 형상의 유한요소 모델

일반적으로 사용되는 골시멘트의 두께는 3~4 mm이다. 시멘트층은 인공고관절에서 가장 문제가 되는 곳이므로 응력의 보다 정확한 값을 알기 위하여 대퇴부 부분의 골 시멘트층을 3 mm로 하고 2개의 층으로 요소 분할하였다.

2.2 경계조건과 재료적 성질

본 연구에서의 기존의 주대(common collar stem)와 변형된 주대(modified collar stem)의 유한요소 모델은 주대의 구조를 제외하고는 같은 형태이다. 경계조건인 고관절 부하 하중(hip reaction force)은 3,000 N이고,

한쪽 다리로서 있는 자세(single leg distance)인 정적인 상태와 완전 구속 조건(restraint)을 사용하였다. 여기서 한쪽 다리로서 서있는 자세를 하중조건으로 고려하는 것은, 달리는 상태를 제외한 가장 큰 하중인 체중의 2.5배의 힘이 고관절에 부여되기 때문이다. 또한 완전 구속 조건은 대퇴골과 주대 사이에 완전한 접촉성을 지니는 시멘트를 사용한 결과이다. Fig. 1에 기존의 주대(common collar stem)와 변형된 주대(modified collar stem)에 대한 각각의 경계조건을 나타냈다. 인공고관절을 구성하는 요소들의 재료적 성질은 Table 1과 같다. 전체 유한요소 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

인공고관절 전치환술시 해결되어야 할 가장 중요한 문제는 부품의 해리이다. 이러한 해리는 주로 과도한 응력집중(stress concentration)에 의한 경계층의 파괴나 응력차단(stress shielding)에 의한 대퇴부(calcus)부근의 골흡수(calcus resorption)에 의해 야기되는 것으로 알려져 왔다. 이러한 해리 과정에서 발생하는 골흡수는 골시멘트의 파단(fracture)과 과도한 응력에 의한 골시멘트 표면의 이상으로 연결된다. 많은 연구에서 대퇴골에 가해지는 응력이 대퇴부의 골흡수로 인하여 증가한다고 보고하고 있는데 원위부의 단단고정이 있을 때 근위부에 가해지는 응력의 감소로 대퇴부의 해리가 발생한다고 한다. 대퇴골의 응력을 정상에 가깝게 하고 골시멘트와 금속의 응력을 줄이기 위하여 새로운 주대의 고안이 이루어지고 있는데 대퇴부에 collar나 더 두꺼운 주대의 사용, 탄성계수가 낮은 titanium alloy의 사용 등이 새로운 개념으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 주대의 내부가 빈 변형된 주대(modified collar stem) 모델을 통해 대퇴골에 응력을 증가시키고자 하였다. 이는 굽힘강성(bending stiffness)을 줄여 탄성계수가 뼈에 가깝게 함으로써 해리가 발생됨을 막기 위한 시도였다.

Fig. 3에 기존의 주대(common collar stem)에 대한 응력분포를 나타냈고, Fig. 4에는 변형된 주대(modified collar stem)에 대한 응력분포를 나타냈다.

기존의 주대(common collar stem)에 대한 결과는 Von Mises 응력으로 나타냈으며 최대응력은 주대에서 160 MPa로, 최소응력은 대퇴골에 전반적으로 53.4 MPa~1 MPa로 나타남을 보여준다. 실질적으로 관심있는 부분은 대퇴골 부분의 응력으로 주대에 비해 전체적으로 비슷한 응력분포를 보여준다. 변형된 주대(modified collar stem)에 대한 결과는 최대응력

Table 1. Material properties

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
Stem (CoCrMd)	207.0 Gpa	0.3
Cement	2.1 Gpa	0.23
Cortical bone	14.0 Gpa	0.23
Trabecular bone	0.5 Gpa	0.3

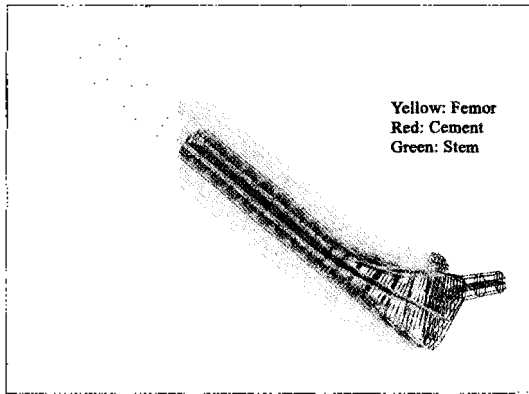


Fig. 2. FEM(Finite Element Method) model of implanted femoral stem.

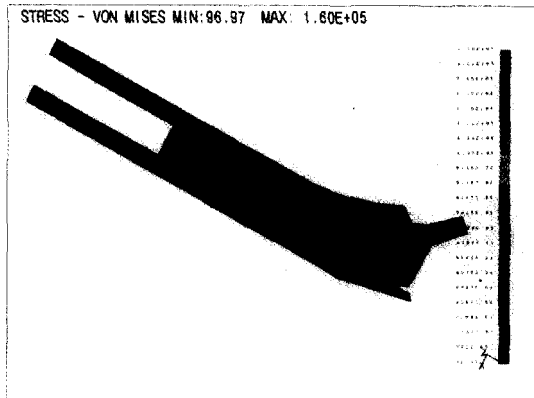


Fig. 3. Von Mises stress of common collar stem.

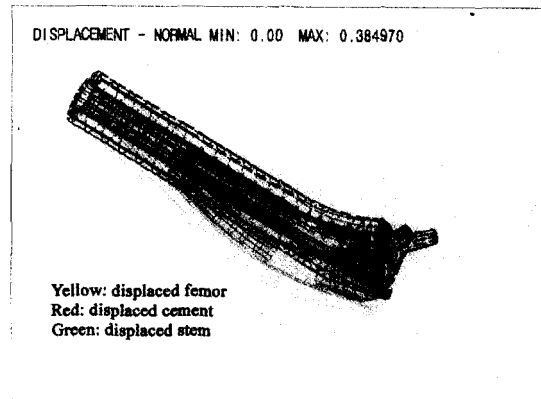


Fig. 5. The displacement of common collar stem.

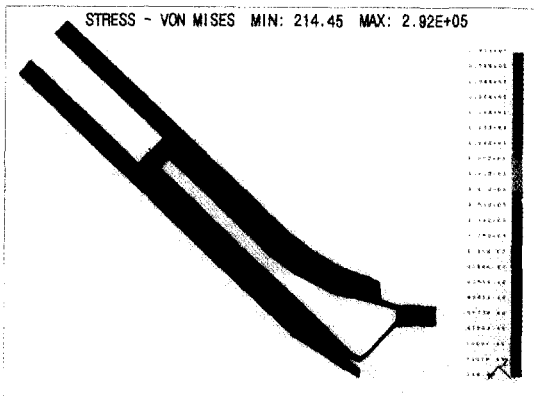


Fig. 4. Von Mises stress of modified collar stem.

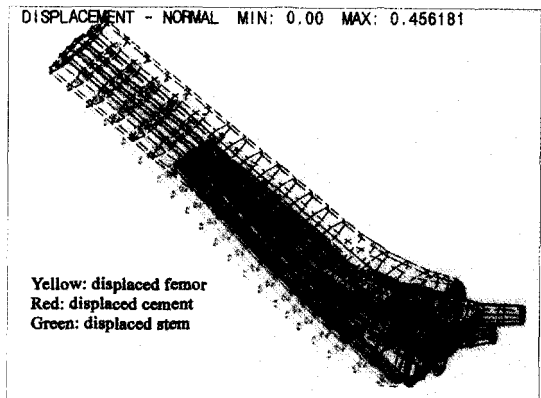


Fig. 6. The displacement of modified collar stem.

이 292 MPa로 주대의 목 부분에서 역시 나타났고, 최소응력은 대퇴골에 전반적으로 균일하게 97.4 MPa ~ 14 MPa로 나타났다. 두 가지 모델을 비교해 보면 전반적으로 응력의 분포 형태는 비슷하지만, 변형된 주대(modified collar stem)가 두배에 가까운 응력의 증가를 보여준다. 이는 변형된 주대(modified collar stem)의 모델이 특정부위의 응력에 변화를 야기시키지 않고, 전반적으로 대퇴골에 가하는 응력을 향상 시킴을 알 수 있다.

Fig. 5에는 기존의 주대(common collar stem)에 대한 변위(displacement)를 나타냈고, Fig. 6에는 변형된 주대(modified collar stem)에 대한 변위(displacement)를 나타냈다.

기존의 주대(common collar stem)는 부하하중에 대한 굽힘응력의 발생으로 턱(collar) 아랫부분에 0.38497의 최대변위가 일어남을 보여준다. 변형된 주대(modified collar stem)는 굽힘응력에 의해 역시 턱(collar) 아랫부분에 0.4581의 최대변위가 일어나

지만 기존의 주대(common collar stem) 모델에 비해 길이 방향에서 전반적으로 변위가 증가했음을 보여준다. 결국 모델의 응력 분포와 변위 분포 결과를 통해, 주대의 내부를 비운 변형된 주대(modified collar stem)가 대퇴골의 응력차단 현상을 효과적으로 해결할 수 있는 방안임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대퇴골의 응력을 정상 값에 근사하고 골 시멘트와 금속의 응력을 줄이기 위한 방안으로 변형된 주대(modified collar stem)를 선정하였다. 변형된 주대는 기존의 주대(Common collar stem)와 모양과 재질은 같지만 내부의 형상이 다른 속이 빈 두께 3 mm의 모델로 선정하였다. 그리고 기존의 주대와 변형된 주대 모델을 유한요소해석을 이용하여 응력분포와 변위를 구해 비교 검토했다. 결과는 변형된 주대의 모델이 기존의 모델과 전체적으로 유사

한 응력분포를 나타내면서도 2배에 가까운 응력 값을 보여주었다.

이를 통해 변형된 주대의 모델이 특정부위의 응력에 변화를 일으키지 않으면서 대퇴골에 가하는 응력을 증가시키는 효과적인 방안을 보여주었다. 차후의 연구과제는 변형된 주대 모델에서 설정한 3 mm의 두께를 대신하여 최적화된 두께와 내부 형상을 구하는 것이다.

참고문헌

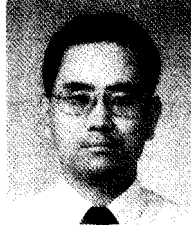
1. Huskies, R., Weinans, H. and Rietbergens, B. van "The relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems and the effects stress shielding and bone resorption around total hip stems and the effects of flexible materials", *Clin Orthop*, 274, 1992.
2. Huskies, R., Weinans, H., Grootenboer, H.J., et al "Adaptive bone remodelling theory applied to prosthetic-design analysis", *J. Biomech*, 20, pp. 1135-1150, 1987.
3. Huskies, R., "The various stress patterns of press-fit, ingrown and cemented femoral stem", *Clin Orthop Rel Res*, 261, pp. 27-38, 1990.
4. Carter, D.R., "Mechanical loading history and skeletal biology", *J. Biomech*, 22, pp. 231-244, 1989.
5. 유명철, 이용걸, 김승기, 전철우 "골시멘트 이용한 인공 고관절 전치환술시 대퇴골 하중전이 향상을 위한 새로운 형태의 주대(Stem)에 대한 전산 및 실험적 연구", 대한정형외과학회지, 제28권, 제1호, pp. 43-50, 1993.
6. 김성곤 "FEM을 이용한 인공고관절 대치술후 응력 방패 현상과 골흡수 분석", 대한고관절학회지, 제6권, 제2호, pp. 172-180, 1994.

윤 경 렬



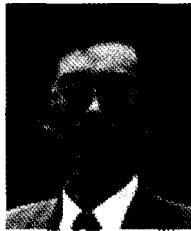
1993년 아주대학교 기계공학과 학사
1995년 아주대학교 기계공학과 석사
1995년~현재 아주대학교 기계공학과 박사 과정
관심분야: Optimum design, Rotor vibration

원 예 연



1984년 연세대학교 의학과 학사
1994년 연세대학교 의학과 석사
1999년 현재 아주대학교 정형외과 조교수
관심분야: Femoral Stem

이 수 훈



1981년 서울대학교 기계설계학과 학사
1983년 위스콘신대학교 기계공학과 석사
1985년 위스콘신대학교 기계공학과 박사
1988년 Marquette대학교 경영학 석사
1985년~1989년 위스콘신대학교 기계공학과 조교수
1992년~현재 아주대학교 기계 및 산업공학 부 부교수
관심분야: Optimum design, Automation